



## การใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต: การวิเคราะห์เชิงสถิติ

ปริญญญา คุณมี<sup>1</sup> ววัชร ส่องเสริม<sup>2\*</sup> และ ชีรเดช วุฒิพรพันธ์<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

ตะกรันเหล็กถูกจัดเป็นของเสียอันตรายที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณตะกรันเหล็กที่เหมาะสมมาใช้แทนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในการผลิตคอนกรีตที่สามารถรับแรงอัดได้ในช่วง 240-260 kg/cm<sup>2</sup> เนื่องจากการศึกษาเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ใช้ตะกรันเหล็กแทนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตรเท่านั้น ผู้วิจัยได้ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองพบว่า ในการผลิตคอนกรีต 1 m<sup>3</sup> สามารถใช้ตะกรันเหล็กแทนส่วนผสมอื่นๆ ได้ถึง 207 kg ซึ่งใช้ผสมแทน ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน เท่ากับ 15.7 kg, 37.4 kg และ 153.9 kg ตามลำดับ โดยใช้เวลาบ่มคอนกรีตที่ 28 วัน คอนกรีตที่ได้จากส่วนผสมดังกล่าวจะรับกำลังอัดเฉลี่ยได้เท่ากับ 250 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กได้ประมาณ 255 บาท และลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตลงได้ร้อยละ 5 ต่อการผลิตคอนกรีต 1 m<sup>3</sup>

**คำสำคัญ:** ตะกรันเหล็ก คอนกรีต การวิเคราะห์เชิงสถิติ

- <sup>1</sup> นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- <sup>2</sup> อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- <sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- \* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9637-5557 อีเมล: watchara.s@rmutp.ac.th

รับเมื่อ 21 ธันวาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 29 พฤศจิกายน 2556



## The Use of Granular Blast Furnace Slag in Concrete Manufacturing: Statistical Analysis

Parinya Koonmee<sup>1</sup> Watchara Songserm<sup>2\*</sup> and Teeradej Wuttiornpun<sup>3</sup>

### Abstract

The granular blast furnace slag from iron industry is classified as hazardous waste with high disposal costs. This research aims to determine an optimal quantity of granular blast furnace slag for the replacement of cement, sand, and rock for producing concrete with the strength between 240-260 kg/cm<sup>2</sup>. Since this is a pilot study, the granular blast furnace slag was used only 10% by volume for replacing cement, sand, and rock. A factorial experiment was then conducted with three replicates. The result was analyzed at 95% confidence interval. According to the results, the optimal quantity of granular blast furnace slag required

for producing 1 m<sup>3</sup> of concrete with the desired strength is 207 kg. This is to use the granular blast slag to replace cement, sand, and rock as 15.7 kg, 37.4 kg, and 153.9 kg, respectively with the concrete at 28 day-age. The average concrete strength obtained from this procedure is 250 kg/cm<sup>2</sup> which falls within the expected range. Furthermore, the company can save slag disposal costs at around 255 baht while reducing the production cost by 5% per 1 m<sup>3</sup> of the produced concrete.

**Keywords:** Granular Blast Furnace Slag, Concrete, Statistical Analysis

<sup>1</sup> Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

<sup>2</sup> Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

\* Corresponding Author, Tel. 08-9637-5557, E-mail: watchara.s@rmutp.ac.th

## 1. บทนำ

ตะกรันเหล็ก (Granular Blast Slag) ประกอบไปด้วย ซิลิกา อะลูมินา แคลเซียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ทำให้ตะกรันเหล็กถูกจัดเป็นของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดจำเพาะประเภทหรือจำเพาะชนิด จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) คาดว่าในประเทศไทยจะมีตะกรันจากเตาหลอมเหล็กเกิดขึ้นโดยประมาณ 500,000 ตันต่อปี หากต้องการกำจัดตะกรันจากเตาหลอมเหล็กด้วยการทำให้เป็นก้อนและนำไปฝังกลบจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเท่ากับ 1,230 บาทต่อตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 0.75 ของราคาเหล็ก [1] ตะกรันจากเตาหลอมเหล็กมีการนำไปใช้ประโยชน์บ้าง เช่น ใช้ในการถมที่หรือนำไปย่อยให้มีขนาดเล็กสำหรับโรยกลบหลุมหรือบ่อของทางเดิน ที่ผ่านมามีการนำตะกรันจากเตาหลอมเหล็กมาเป็นวัสดุผสมในวัสดุชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และใช้เป็นวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานถนน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำตะกรันจากเตาหลอมเหล็กที่ไม่ใช้แล้วมาเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตที่ กำลังอัด 240-260 kg/cm<sup>2</sup> เพื่อที่จะเป็นการส่งเสริมการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต เนื่องจากเป็นทดลองเบื้องต้นงานวิจัยนี้จะใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์ หยาบ และหิน ในสัดส่วนเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรเท่านั้น

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในปี 2003 Pal et al. [2] ได้ศึกษาการใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้ตะกรันเหล็กจากหลายๆ แหล่ง ผลการศึกษาพบว่าการใช้ตะกรันเหล็กในปริมาณเท่ากันแต่มาจากสถานที่ต่างกันจะทำให้การรับแรงอัดของคอนกรีตไม่เท่ากัน ในปี 2005 Larforest and Duchesne [3] ได้ทำการศึกษาสารโครเมียมในคอนกรีต หลังจากการใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมของคอนกรีตแทน

ปูนพอร์ตแลนด์แบบธรรมดา ผลการศึกษาพบว่าการใช้ตะกรันเหล็กมีผลต่อสารโครเมียมในทิศทางที่ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และในปีเดียวกัน Kwon [4] ได้ทดลองใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์ ผลการทดลองพบว่าการใช้ตะกรันเหล็กแทนปูนซีเมนต์ 30% จะสามารถลดการขยายตัวของคอนกรีตชนิดทนแรงอัดสูงได้ดี ในปี 1999 Chatsanguthai [1] ได้ศึกษาความเสถียรของกากตะกรันเหล็กโดยใช้วัสดุประสานชนิดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะเป็นวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุด ประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด และให้กำลังอัดดีที่สุด ต่อมาในปี 2000 Thai-Usa [5] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 5 ผสมกับตะกรันเหล็ก พบว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเหล็กไม่เกินร้อยละ 30 และมีความละเอียดระหว่าง 5,000 – 8,000 cm<sup>2</sup>/g สามารถนำไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ได้ ต่อมาในปี 2002 Pasunttaviroj [6] ได้ศึกษาการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพซีเมนต์มาปรับปรุงคุณภาพตะกรันเหล็กเทียบกับมาตรฐานซีเมนต์ที่กำหนดโดยกรมทางหลวง ซึ่งใช้ค่ากำลังอัด (Unconfined Compressive Strength: UCS) เป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณา พบว่าตัวอย่างตะกรันเหล็กผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ให้ค่า UCS และให้ค่า California Bearing Ratio (CBR) สูงขึ้น ตามปริมาณของซีเมนต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในปี 2010 Ngenprom [7] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของชั้นทางดินลูกรังบดอัดผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และตะกรันเหล็ก เพื่อหาปริมาณส่วนผสมสำหรับใช้ปรับปรุงดินชั้นทาง พบว่าปริมาณส่วนผสมที่ประกอบด้วยดินลูกรัง 95% ผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 3.5% และตะกรันเหล็ก 1.5% เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีผลให้ค่า CBR สูงขึ้นและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของชั้นทางดินซีเมนต์ที่กำหนดโดยกรมทาง

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำตะกรันเหล็กมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต โดยในงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่จะใช้ตะกรันแทนปูนซีเมนต์ แต่ต้องการจะใช้ตะกรันทดแทนหิน

และทรายอีกด้วย และเนื่องจากมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวิธีการออกแบบและวิเคราะห์ การทดลองมาใช้เพื่อที่จะกำหนดปริมาณที่เหมาะสมของ ตะกรันเหล็กในคอนกรีต ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

### 3. การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนี้ผู้วิจัยได้แบ่งตัวแปร ออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 ตัวแปรอิสระ

ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษา และวิเคราะห์ร่วมกับทีมวิศวกร เพื่อที่จะกำหนดปัจจัย และระดับที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เมื่อมีตะกรันเหล็กเป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมคอนกรีต น้ำหนักที่กำหนดให้กับระดับของปัจจัยต่างๆ เป็นน้ำหนัก ที่คำนวณจากปริมาตรการผสมคอนกรีต 1 m<sup>3</sup> โดยใช้ส่วนผสมมาตรฐาน ยกตัวอย่างเช่น สูตรมาตรฐานในการผสม คอนกรีต 1 m<sup>3</sup> จะใช้ปูนซีเมนต์ 305 kg ถ้าต้องการผสม ตะกรันเหล็ก 10% โดยปริมาตร จะต้องใช้ตะกรันเหล็ก เท่ากับ 38.1 kg และลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงเหลือ 274.5 kg (คำนวณโดยใช้ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ และตะกรัน) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	รหัส	ระดับของปัจจัย
ปูนซีเมนต์ (A)	-1	ปูนซีเมนต์ 305 kg
	+1	ปูนซีเมนต์ 274.5 kg ผสมตะกรันเหล็ก 38.1 kg
ทราย (B)	-1	ทราย 635 kg
	+1	ทราย 571.5 kg ผสมตะกรันเหล็ก 76.6 kg
หิน (C)	-1	หิน 1275 kg
	+1	หิน 1147.5 kg ผสมตะกรันเหล็ก 153.9 kg
อายุของคอนกรีต (D)	-1	อายุ 7 วัน
	+1	อายุ 28 วัน

\* ปัจจัย A, B, C ที่ระดับ -1 เป็นสูตรมาตรฐานในการผสมคอนกรีต

Session

## Power and Sample Size

### 2-Level Factorial Design

Alpha = 0.05    Assumed standard deviation = 5.79871

Factors:        4        Base Design: 4, 16  
Blocks:   none

Center Points	Effect	Reps	Total Runs	Power
0	5	3	48	0.825435

รูปที่ 1 ผลลัพธ์การหาค่ากำลังของการทดสอบ

#### 3.2 ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามในงานวิจัยนี้ คือ ค่าการรับแรงอัดของ คอนกรีต ผู้วิจัยจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิง แฟกทอเรียล เพื่อศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม ของปัจจัยต่างๆ พร้อมกัน และทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง รวมเป็น การทดลองทั้งสิ้น 48 การทดลอง ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ การรับแรงอัดคอนกรีตมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 เซนติเมตร เท่ากันทุกด้าน และมีหน่วยวัด แรงอัดคือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

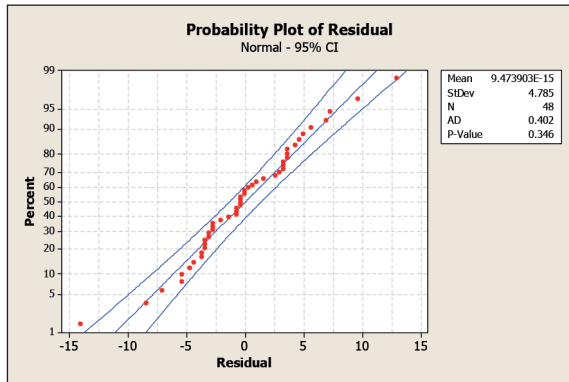
### 4. กำลังในการทดสอบ (Power of Test)

การตรวจสอบค่ากำลังการทดสอบข้อมูลเพื่อหา จำนวนการทดลองซ้ำที่เหมาะสม ผลการคำนวณแสดง ได้ดังรูปที่ 1

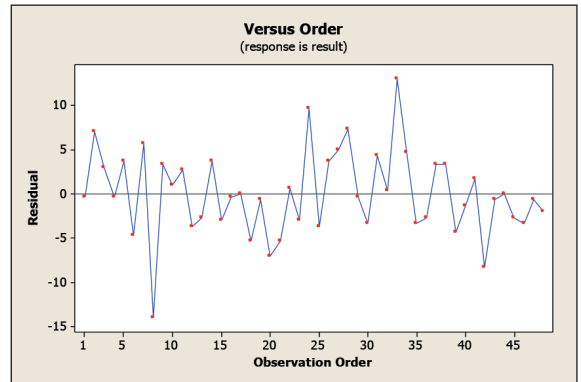
จากการกำหนดค่าความละเอียดของการทดลอง ที่ 5 kg/cm<sup>2</sup> พบว่าที่การทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง จะให้ค่า อำนาจการทดสอบข้อมูลเท่ากับ 0.825 หรือหมายถึงการมี โอกาสในการเกิดความผิดพลาดแบบที่ 2 ( $\beta$ ) เพียง 17.5% ซึ่งถือได้ว่าเป็นจำนวนการทดลองซ้ำที่เพียงพอแล้ว [8]

### 5. ผลการทดลอง

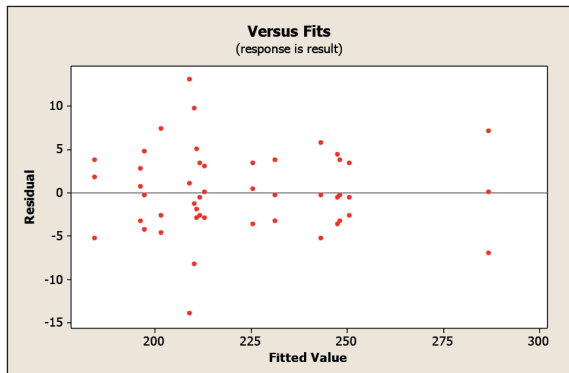
ผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์ผลทดลองออกเป็น 2 หัวข้อได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ การทดลอง และการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 การทดสอบกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง



รูปที่ 4 การทดสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง



รูปที่ 3 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

**Factorial Fit: Result versus A, B, C, D**

Estimated Effects and Coefficients for Result (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		223.04	0.8370	266.49	0.000
A	-35.25	-17.63	0.8370	-21.06	0.000
B	-10.00	-5.00	0.8370	-5.97	0.000
C	9.42	4.71	0.8370	5.63	0.000
D	27.00	13.50	0.8370	16.13	0.000
A*B	13.00	6.50	0.8370	7.77	0.000
A*C	-7.75	-3.87	0.8370	-4.63	0.000
A*D	-6.00	-3.00	0.8370	-3.58	0.001
B*C	-6.83	-3.42	0.8370	-4.08	0.000
B*D	4.75	2.37	0.8370	2.84	0.008
C*D	8.50	4.25	0.8370	5.08	0.000
A*B*C	7.00	3.50	0.8370	4.18	0.000
A*B*D	2.08	1.04	0.8370	1.24	0.222
A*C*D	2.33	1.17	0.8370	1.39	0.173
B*C*D	3.08	1.54	0.8370	1.84	0.075
A*B*C*D	5.25	2.62	0.8370	3.14	0.004

S = 5.79871 PRESS = 2421  
R-Sq = 96.74% R-Sq(pred) = 92.67% R-Sq(adj) = 95.22%

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง

## 5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองใน 3 หัวข้อตามลำดับดังนี้ [9]

1) ตรวจสอบการกระจายตัวของส่วนตกค้างในรูปที่ 2 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ ( $p\text{-value} = 0.346$ ) ซึ่งถูกต้องตามทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

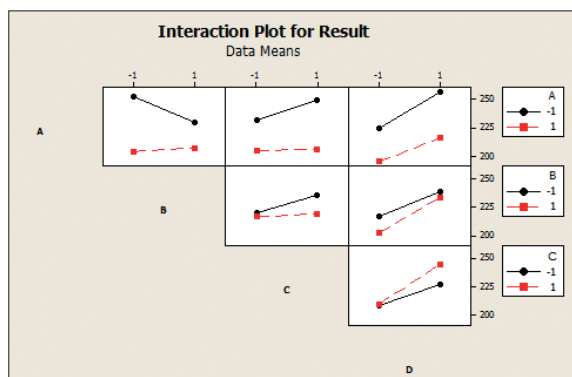
2) ตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนจากรูปที่ 3 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีความเสถียรของความแปรปรวนอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ไม่มีความแปรปรวนของส่วนตกค้างที่มากหรือน้อยเกินไป

3) ตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง จากรูปที่ 4 พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่เป็นแนวโน้ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองเป็นอิสระต่อกัน

จากผลการตรวจสอบทั้ง 3 หัวข้อ จะเห็นได้ว่ารูปแบบของการทดลองมีความถูกต้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัย ซึ่งจะได้แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในหัวข้อถัดไป

## 5.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ทำการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 16 จากรูปที่ 5 พบว่าทุกปัจจัยหลักล้วนส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป พบว่าผลกระทบร่วมของแทบทุกปัจจัยล้วนส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน



รูปที่ 6 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมแต่ละคู่ของปัจจัย

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถเขียนสมการการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Y) ในรูปของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ เพื่อที่จะนำไปหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยได้ดังนี้

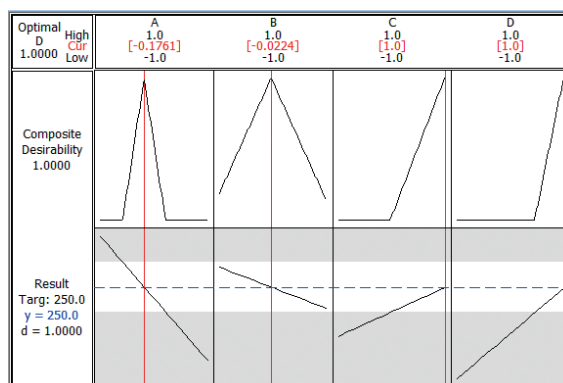
$$Y = 223.04 - 17.63A - 5.00B + 4.71C + 13.50D + 6.50AB - 3.87AC - 3.00AD - 3.42BC + 2.37BD + 4.25CD - 3.50ABC + 2.62ABCD$$

จากรูปที่ 6 พบว่าการใช้ตะกรันเหล็กผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีผลทำให้การรับแรงอัดลดลง ส่วนการใช้ตะกรันเหล็กผสมทดแทนทรายและหินจะส่งผลให้การรับแรงอัดสูงขึ้น ในขณะที่ถ้าบ่มคอนกรีตที่ระยะเวลาสั้นขึ้นจะทำให้ได้การรับแรงอัดที่ดีขึ้นไม่ว่าจะมีตะกรันเหล็กผสมอยู่หรือไม่ก็ตาม

## 6. การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 240-260 kg/cm<sup>2</sup>

การตั้งค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าที่เหมาะสม จะใช้หลักการดังต่อไปนี้

- 1) คำนวณโดยใช้ค่าการรับแรงอัดที่ 240 และ 260 kg/cm<sup>2</sup> เป็นขอบเขตล่าง และขอบเขตบน ตามลำดับ
- 2) ตั้งค่าที่ต้องการไว้ที่ 250 kg/cm<sup>2</sup> เนื่องจากต้องการเผื่อความคลาดเคลื่อนของตัวเลขจากการทดลอง ให้สามารถรองรับความคลาดเคลื่อนได้ถึง +/- 10 kg/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 7 ค่าที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตที่สามารถรับแรงอัดระหว่าง 240-260 kg/cm<sup>2</sup>

จากผลลัพธ์ได้แสดงในรูปที่ 7 เมื่อเปลี่ยนค่ารหัสให้เป็นค่าจริงโดยใช้ค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละส่วนผสม จะได้ปริมาณของแต่ละส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2

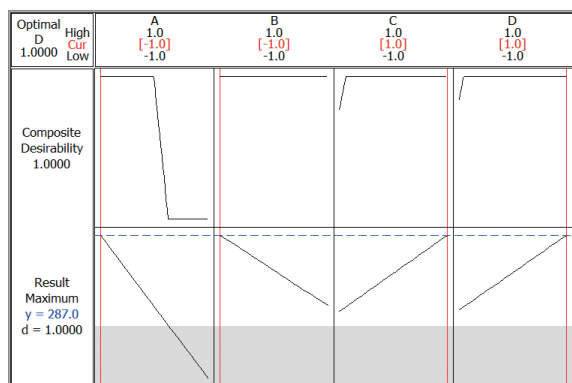
ตารางที่ 2 ค่าของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีต 1 m<sup>3</sup>

ปัจจัย	รหัส	ระดับของปัจจัย
ปูนซีเมนต์	-0.1761	ปูนซีเมนต์ 292.4 kg ผสมตะกรันเหล็ก 15.7 kg
ทราย	-0.0224	ทราย 604 kg ผสมตะกรันเหล็ก 37.4 kg
หิน	+1	หิน 1,147.5 kg ผสมตะกรันเหล็ก 153.9 kg
อายุคอนกรีต	+1	อายุ 28 วัน

## 7. การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด

เมื่อกำหนดค่าเป้าหมายของกำลังรับแรงอัดเป็นค่าสูงสุด จะได้ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยดังแสดงในรูปที่ 8 จากผลลัพธ์ดังกล่าว พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจะมีค่า 287 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตปกติที่ไม่มีส่วนผสมของตะกรันเหล็กประมาณร้อยละ 15 และเมื่อเปลี่ยนค่ารหัสให้เป็นค่าจริง พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สุด คือ การใช้ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และอายุการบ่มคอนกรีต โดยมีส่วนผสมของแต่ละปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 3





รูปที่ 8 ค่าที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตรับแรงอัดสูงสุด

ตารางที่ 3 ค่าของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีต 1 m<sup>3</sup> ที่ให้การรับแรงอัด 287 kg/cm<sup>2</sup>

ปัจจัยที่ควบคุม	รหัส	ระดับของปัจจัย
ปูนซีเมนต์	-1	ปูนซีเมนต์ 305 kg
ทราย	-1	ทราย 635 kg
หิน	+1	หิน 1,147.5 kg ผสมตะกรันเหล็ก 153.9 kg
อายุคอนกรีต	+1	อายุ 28 วัน

## 8. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้ตะกรันเหล็กทดแทนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในการผลิตคอนกรีต เพื่อเป็นแนวทางในการนำของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมเหล็กที่ไม่มีมูลค่าไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย และเพื่อลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต โดยยังคงได้คอนกรีตที่มีการรับแรงอัดได้ไม่น้อยไปกว่าเดิม สำหรับส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ได้จากงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

1) ส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 240-260 kg/cm<sup>2</sup> จะใช้ตะกรันเหล็กรวม 207 kg ต่อการผลิตคอนกรีต 1 m<sup>3</sup> ซึ่งส่วนผสมดังกล่าว จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กลงได้ประมาณ 255 บาท และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงประมาณ 5%

2) ส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่มีการรับแรงอัดได้สูงสุด พบว่าถ้าใช้ตะกรันเหล็ก 153.9 kg ในการผลิตคอนกรีต 1 m<sup>3</sup> จะทำให้มีการรับแรงอัดได้สูงถึง 287 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของตะกรันเหล็กถึง 15% จากส่วนผสมนี้จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กลงได้ประมาณ 125 บาท และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงประมาณ 2.8%

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กและลดต้นทุนของการผลิตคอนกรีต อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณตะกรันเหล็กและคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของตะกรันเหล็ก เช่น คุณสมบัติในแง่การใช้งานระยะยาว (Long-term Properties) โดยพิจารณาถึงการหดหรือขยายตัวของคอนกรีต เป็นต้น

## 9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัทไทยโรตารี จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนในการจัดทำตัวอย่างคอนกรีต และบริษัท โบลเตอร์สจ๊วต จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การอนุเคราะห์โปรแกรม MINITAB 16 สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chatsanguthai, "Stabilization of arc furnace slag using portland cement and/or lime," Thesis, Chulalongkorn University, 1999.
- [2] S. C. Pal, A. Mukherjee, and S. R. Pathak,



- “Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete,” *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, Issue 9, pp. 1481-1486.
- [3] G. Laforest and J. Duchesne, “Immobilization of chromium (VI) evaluated by binding isotherms for ground granulated blast furnace slag and ordinary Portland cement,” *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, Issue 12, pp. 2322-2332.
- [4] Y. J. Kwon, “A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect,” *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, Issue 7, pp. 1305-1313.
- [5] V. Thai-Usa, “Effect of Granular Blast Furnance Slag on Morts Proprety,” in *The 6<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering*, vol. 1, 2000.
- [6] C. Pasunttaviroj, “Cement Stabilization of Steel Slag,” Thesis, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2002.
- [7] N. Ngenprom, “Study on Properties of Laterite Soil Portland Cement and Slag Mix as a Pavement Materials,” *RMUTP Research Journal*, vol. 4, no. 1, 2010.
- [8] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5<sup>th</sup> edition, The United States of America: Johnson Wiley & Sons, Inc., 2001.